TenFong 十沣

TF-Solid
固体仿真平台

产品宣传册



地　址：深圳市南山区学苑大道1001号南山智园
D1栋23、24楼

电　话：0755-86961672 (深圳总部)

邮　箱：info@tenfong.cn

网　站：www.tenfong.cn

售　后：400-996-8696

公众号：

Copyright© 十沣科技 版权所有

深　圳　十　沣　科　技　有　限　公　司

奉献工业AI的盛宴

FEAST

公司概况

深圳十沣科技有限公司（以下简称“十沣”）成立于2020年，围绕“CAE+AI+数字孪生”技术路线，专注于自主可控多物理场CAE求解器、AI+CAE融合技术及工业AI平台的研发与产业化，构建面向制造业的物理AI引擎和工业AI应用平台。十沣是国家级专精特新“小巨人”企业，也是国内少数同时具备高端工业软件关键核心技术攻关能力与工业AI融合创新能力的企业之一。



面向国家战略性新兴产业和先进制造业智能化升级需求，十沣坚持以客户需求和产业应用为导向，持续打造覆盖研发设计、仿真分析、工艺优化、生产制造和运行运维等环节的工业智能化解决方案。目前，公司产品和服务已广泛应用于航空航天、汽车交通、船舶与海洋工程、电子电器、装备制造、能源动力等9大行业，累计服务500余家企业用户，形成从底层仿真求解器、工业数据与模型，到物理AI和智能化应用解决方案的完整技术体系和规模化产业交付能力。



面向未来，十沣将以“自主CAE规模化国产替代+工业AI新业务快速放量”为双轮驱动，持续推动自主CAE、物理AI、工业大模型与工业智能体深度融合，加快从自主工业软件领先企业向具有全球竞争力的工业AI平台型企业跃迁。



270+
计算机软件著作权

45+
已获授权专利

500+
企业客户

25+
行业链主企业战略合作

20+
区域产业化基地

25+
产学研合作

30+
国家级、省级攻关项目

70%+
硕博人员占比

奉献工业AI的盛宴

Accurate 精准
物理约束保障预测可信

Easy to use 便捷
智能交互降低使用门槛

Specialized 专业
深度融合行业工程知识

FEAST

Fast 高效
AI加速仿真与设计迭代

Total Solution 全面
贯通工业全流程应用

自主软件体系

数字智能化平台

- **TF-AIDEA** 人工智能仿真平台
- **TF-Pandroid** 仿真数据管理系统
- **TF-AIMDO** 多学科优化
- **TF-ClouDESIGN** 工程仿真云平台

行业智能化应用

- **TF-Thermal** 热仿真
- **TF-Turbo** 叶轮机械仿真
- **TF-SimFARM** 风资源仿真
- **TF-SimCITY** 低空风场
- **AIDEA-Aero** 汽车气动智能体
- **TF-ShipL** 船舶吊装工艺仿真

工业AI应用

TENFONG 十沣

物理AI引擎

流体仿真引擎

- **TF-QFLUX** 通用流体力学
- **TF-Lattice** LBM流体力学
- **TF-CFlow** 空气动力学
- **TF-SPH** 光滑粒子动力学

固体仿真引擎

- **TF-Struct** 通用结构力学
- **TF-Dyna** 显式动力学
- **TF-DCAMS** 机械系统动力学

多物理仿真引擎

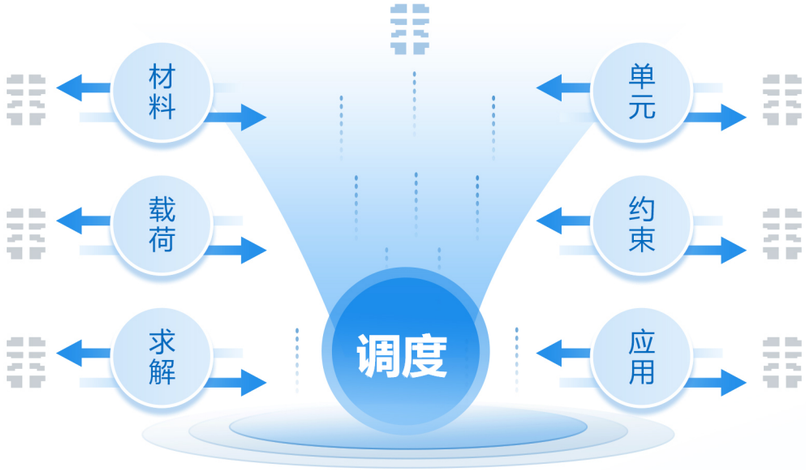
- **TF-eMag** 电磁仿真
- **TF-Acoustics** 声学仿真
- **TF-DEM** 通用颗粒系统
- **ZF-Grid** 通用前处理

产品简介

TF-Solid 固体仿真软件平台

TF-Solid是深圳十沣科技有限公司自主开发的有限元分析平台，平台具备通用结构、显式动力学、多体动力学分析模块，支持静力学、瞬态、模态、频响、响应谱、随机振动、疲劳、复合材料、结构优化、转子动力学，显式、半显式，多体运动学、动力学、静平衡等分析类型，可进行结构刚度、强度、振动、疲劳耐久、高速冲击、结构防护、金属成型、复杂机械系统运动等仿真分析，已广泛应用于机械制造、航空航天、汽车交通、船舶海工、电子电器等领域。

平台的前后处理模块具备统一的界面风格，清晰的用户交互逻辑，用户可以方便快捷地完成CAE分析流程。内核求解器具备高性能并行计算的求解能力。



3+1

系统级仿真底层架构

实现三通一平：数据、信息、操作三通，建立操作调度平台；实现操作功能的热插拔：实现程序运行轻量化，和开发工作局部化；标准的热插拔技术实现接近公式化的各种功能的UDF实现。

15+

应用标杆

TF-Solid已交付给十几家行业龙头用户单位，并开展试用对标、算例验证和模块定制开发工作。软件面向行业特点与用户习惯，与用户紧密联系，持续完善与迭代软件功能，协助用户实现了降本增效，促进了数字化转型过程。

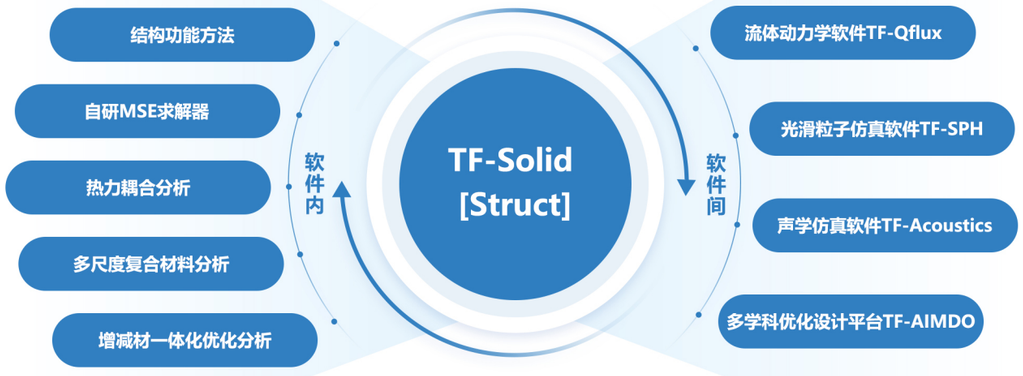
平台采用独创的总线式热插拔结构，解决了传统架构各功能交叉耦合、不易维护扩展的不足，模块化的架构设计能够实现开发工作的局部化，保证软件功能开发与应用的稳定、高效、易用。总线式架构实现了数据、操作、指令的互联互通，能够方便地进行功能的复用与组合，可支撑多科学跨尺度的耦合仿真。

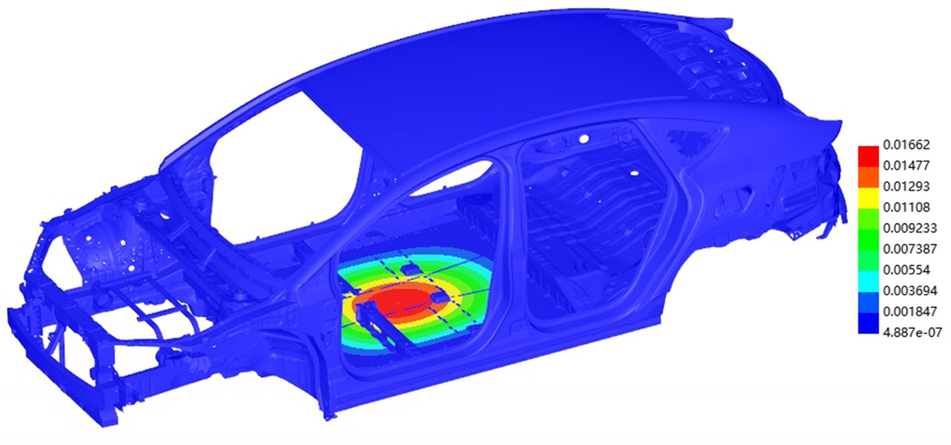
在此基础上， TF-Solid将进一步开发完善系统级联合仿真能力，包括但不限于刚柔耦合分析、流固耦合分析、热力耦合分析、声固耦合分析、显隐切换、刚柔转换、控制耦合、均匀化分析等。持续提升软件鲁棒性、准确性与并行效率，为用户提供更完善、更准确、更高效的结构分析工具与数值分析综合解决方案。

TF-Solid [Struct]

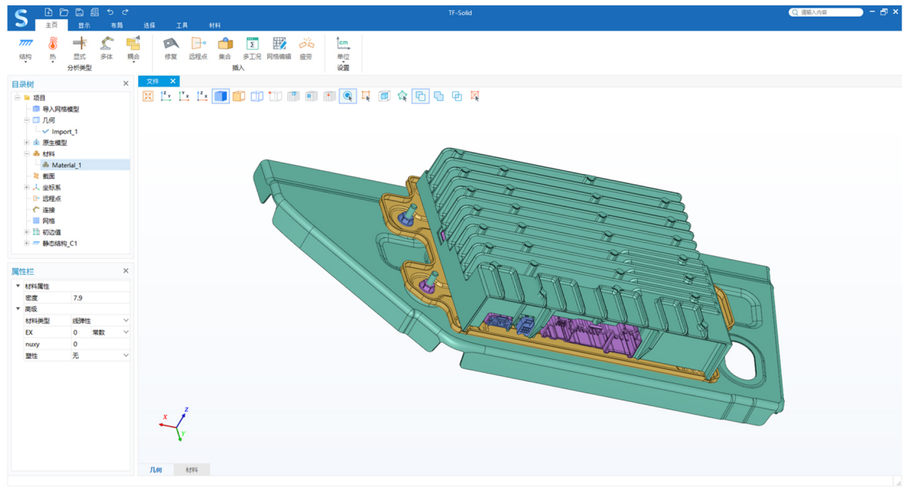
TF-Solid [Struct]是TF-Solid 平台上的一款通用结构分析软件，包含了静力学分析、线性屈曲分析、非线性分析，以及各种结构动力学分析（瞬态、模态、谐响应、响应谱、随机振动、转子动力学等）、结构优化分析等在内的分析功能。为许多工程问题提供了一整套适应面宽的单元库、材料模型和求解器。

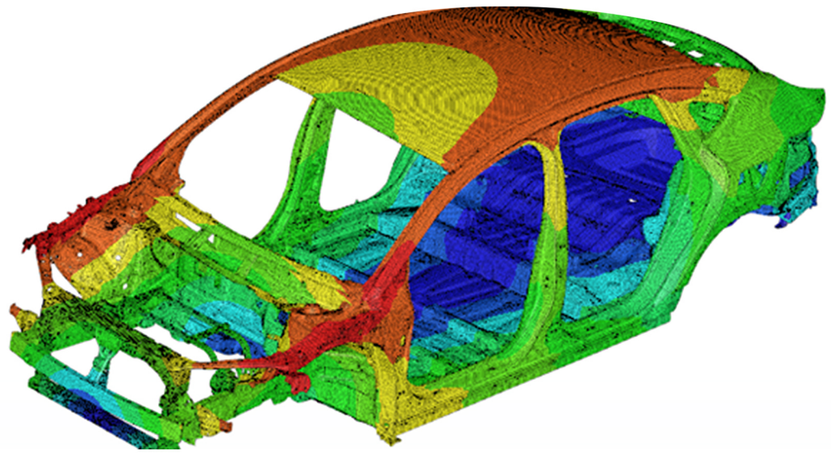
TF-Solid [Struct]求解器具有丰富的单元类型及材料本构模型、灵活的连接装配方式、多种载荷约束施加方式以及静/动力、线性/非线性有限元求解器，能够满足复杂工程结构分析的需求。





技术特点



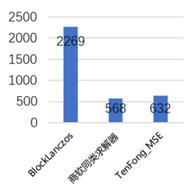


技术特点

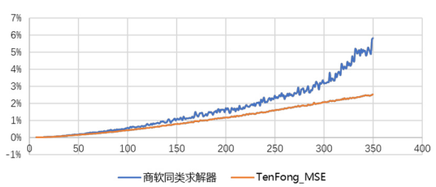
多级子结构特征值求解器

多级子结构特征值求解器(MSE solver)，用于快速、近似求解大规模对称线性系统的特征值问题，特别适合同时求解较多数量的特征值及特征向量。

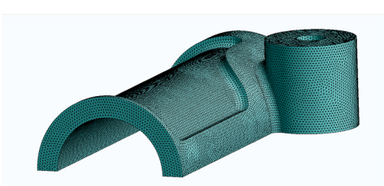
十沣的多级子结构特征值求解器达到了业界的先进水平，性能媲美商用软件中同类求解器的顶级性能。



时间（s）



前350阶特征值与Block Lanczos结果的相对误差

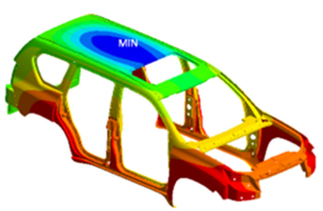


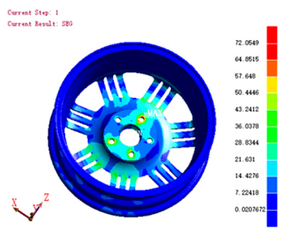
自研MSE求解器性能对比

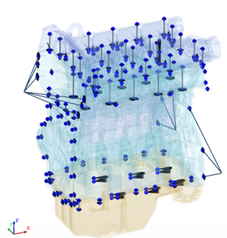
丰富的分析类型

TF-Solid [Struct]具备丰富的分析功能，包括：

- ✓ 静力学分析
- ✓ 线性屈曲分析
- ✓ 模态分析
- ✓ 响应谱分析
- ✓ 随机振动分析
- ✓ 瞬态响应分析
- ✓ 转子动力学分析
- ✓ 结构优化



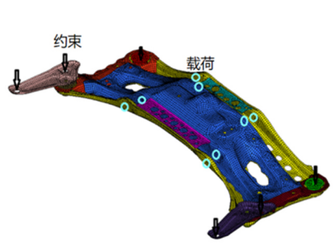




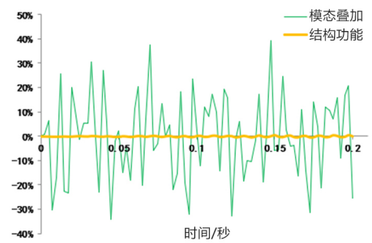
复杂模型计算

结构功能方法

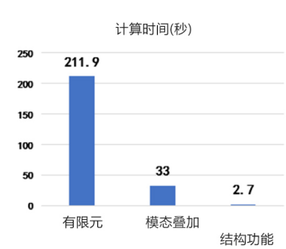
自研的基于动力减缩的结构功能分析方法，相比传统柔性体建模采用的模态叠加法，其计算精度显著提高，该方法在降阶的同时还做到了几乎无损地还原有限元大模型的计算结果，同时，其计算效率相对比模态叠加法提高了一个数量级。基于该方法的刚柔耦合分析，其计算精度和效率也会显著提升。



(a)结构模型



(b)计算精度对比

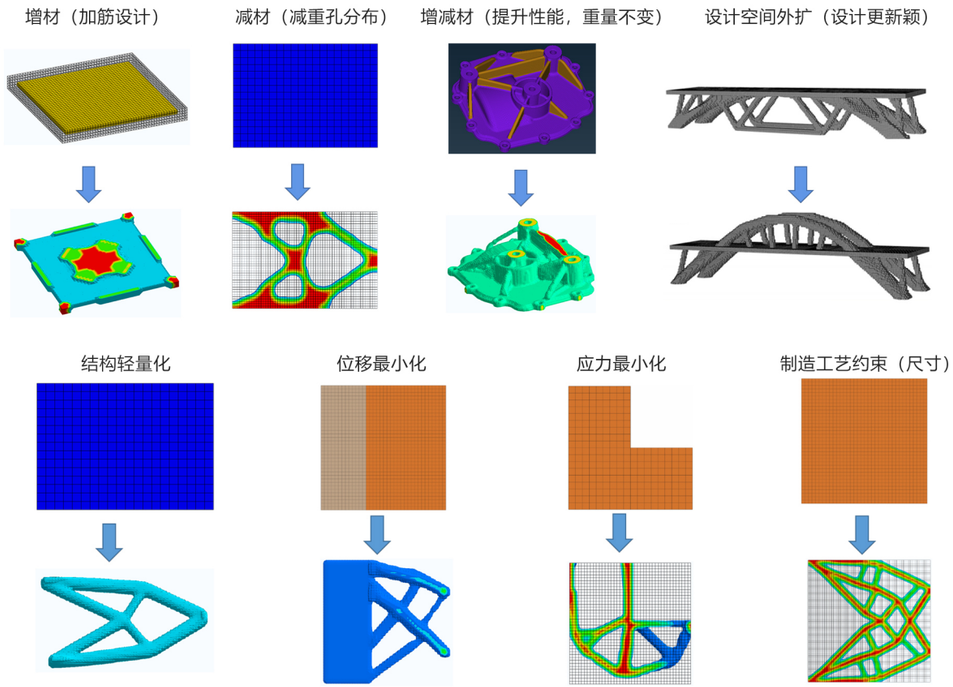


(c)计算精度对比

结构功能建模法计算效率与精度与传统方法对比

增减材一体化结构优化技术

- ✓ 采用统一设计单元，允许设计域外扩，在重要区域增材，在无效区域减材，自适应网格高分辨率设计
- ✓ 主要用于结构产品的性能提升及结构减重设计，支持制造工艺约束满足功能加工需求



复合材料分析

- 纤维增强复合材料宏观非线性本构
- 具有几何和物理微结构特征的材料宏观本构
- 跨尺度计算与均匀化
- 复合材料强度准则与校核
- 复合材料材料库

TF-Solid [Struct]软件可考虑复合材料的铺层设计、纤维方向、层间效应等因素，以及不同物理场之间的耦合作用。
支持不同的复合材料失效判据，包括纤维断裂、基体开裂、层间剥离、纤维-基体脱粘等多种形式。
复合材料的建模仿真涉及多个尺度，从微观到宏观，不同尺度上的物理现象和数值方法有所不同。这就要求建模仿真时选择合适的尺度和方法，以及考虑尺度之间的转换和均质化。
复合材料的建模仿真需要大量的计算资源和时间，尤其是对于大型或复杂的结构。这就要求建模仿真时优化计算效率和精度，以及利用高性能计算平台和并行算法。
通过均匀化技术，建立针对复合材料整体的等效本构模型，用较少的单元数量，在保证精度的前提下，实现复合材料的快速建模与计算。同时，含内变量的跨尺度复合材料模型支持疲劳仿真分析。

本构模型

- 可考虑纤维增强层、均质层以及芯层（均质或蜂窝芯）
- 正交各向异性
- 横观各向同性
- 各向同性
- 可以基于纤维、基体的材料属性分析复合材料的宏观和细观力学响应
- 可以通过基体的混合率公式来预测工程常数和各种系数

复合材料强度准则

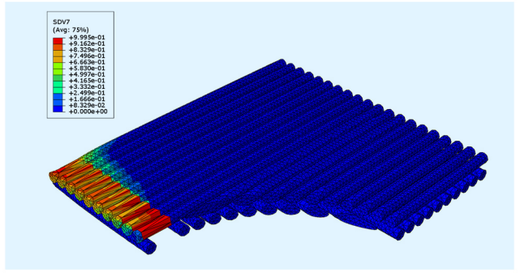
- Max-Stress准则
- Max-Strain准则
- Tsai-Hill准则
- Hoffman准则
- Hashin准则
- Puck准则
- 首层破坏失效方法
- 渐进失效计算方法

复合材料结构单元

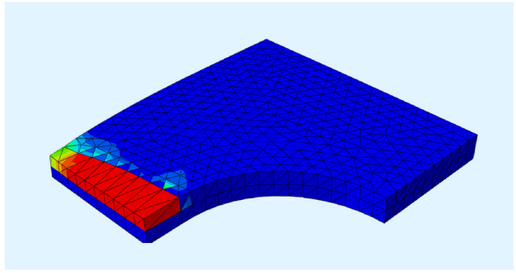
- 梁结构，包含T型梁、工型梁、L型梁、口型梁、Z型梁、圆形截面梁、矩形截面梁、圆柱壳截面梁、几型梁、匚型梁、自定义任意截面梁
- 板壳结构，包含矩形板、圆柱壳、球面壳、圆锥壳等
- 临界失稳载荷分析
- 屈曲特征分析

许用值计算与强度校核

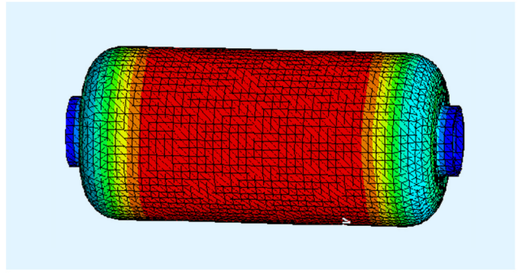
- 支持txt、csv等格式的材料试验数据
- 基于CMH-17许用值计算
- 支持异常数据检查、方差等同性检验、批间变异性检验以及基于正态分布、对数正态分布、威布尔分布或方差分析的B基准和A基准许用值计算
- 典型圆角区结构强度校核
- 钉载分配分析
- 复合材料胶接件分析



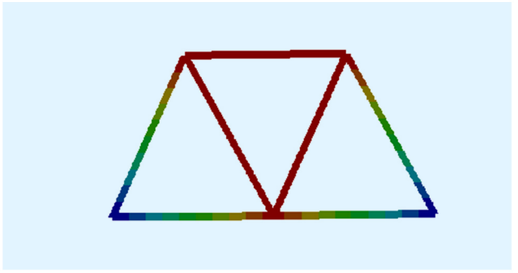
纤维损伤（直接模拟）



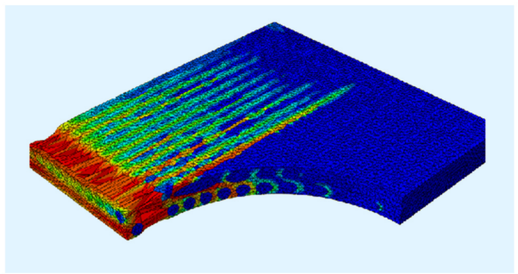
纤维损伤（均匀化）



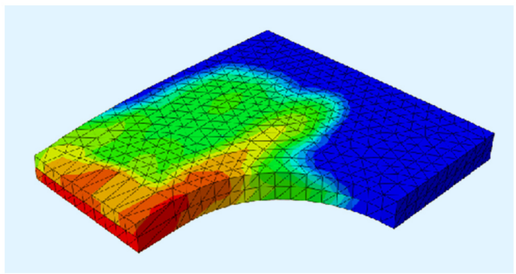
复合材料压力容器分析



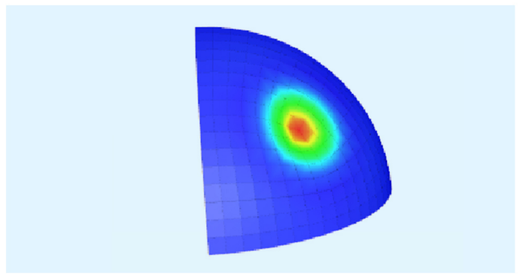
复合材料梁结构分析



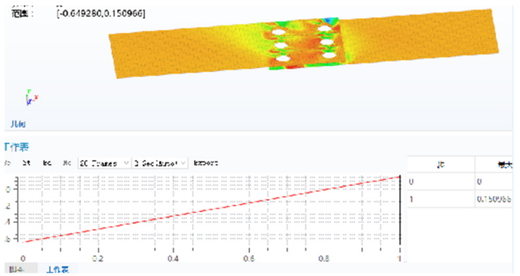
基体损伤（直接模拟）



基体损伤（均匀化）



复合材料球壳结构分析

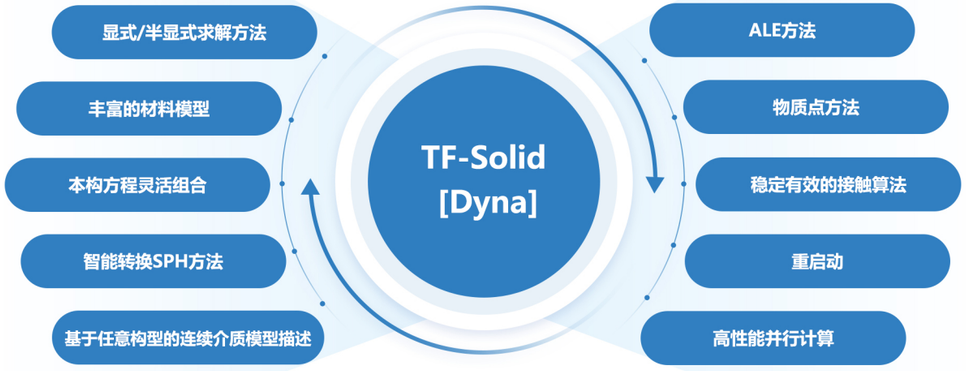


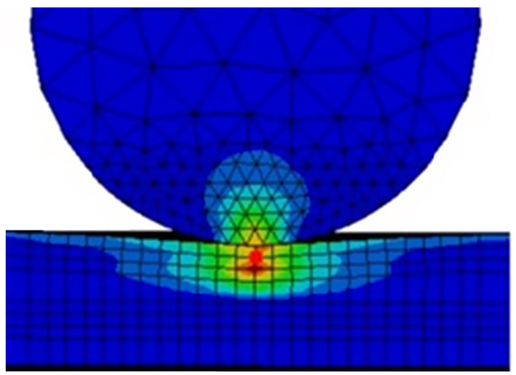
钉载分配分析

TF-Solid [Dyna]

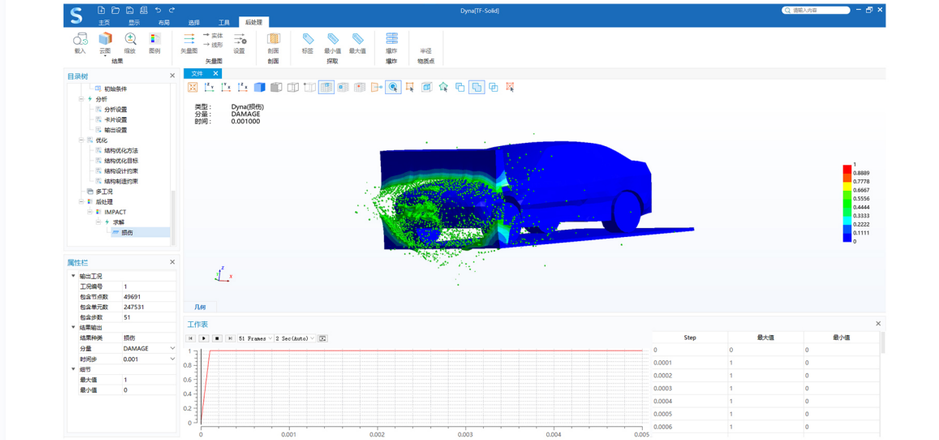
TF-Solid [Dyna]是一款显式动力学仿真软件，具有显式、半显式、隐式求解功能。具有丰富的材料本构模型，含基本的弹性模型、弹塑性模型，超弹模型，粘弹模型，ANAND模型，混凝土材料、陶瓷材料等，涵盖线性多项式、结构、炸药、空气等状态方程，具有Lemaitre损伤模型、Gurson损伤模型、Rousselier损伤模型、Johnson-Cook损伤模型、Borvik损伤模型。其核心算法为全局/局部接触搜索算法、任意构型的连续介质模型、高精度自适应光滑粒子算法以及MPM物质点法，基于嵌入边界的流固耦合。

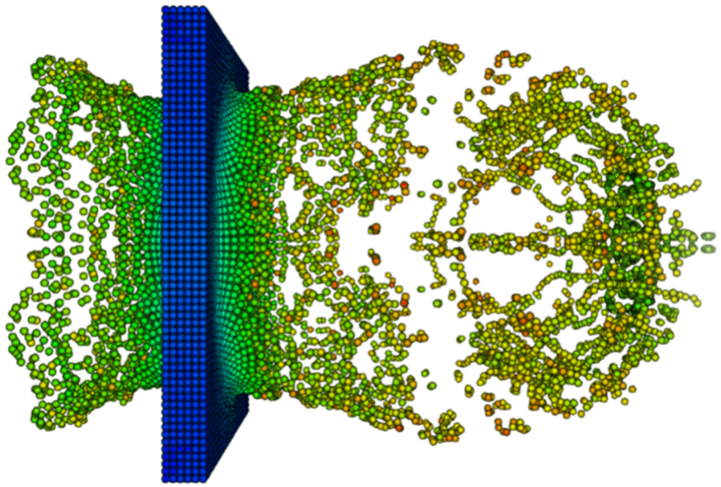
在算法精度和稳定性，以及模拟的准确和有效性，TF-Solid [Dyna]都不亚于国际主流先进水平，可广泛应用于航空航天、新能源、建筑与环境工程、汽车与轨道交通等领域。可以准确模拟分析各类复杂的接触、撞击、损伤断裂，以及结构破坏过程，爆轰波与冲击波的传播过程，冲击防护过程及结构碰撞过程等物理问题。





技术特点





丰富的材料模型

- 材料本构模型
- 塑性、脆性准则
- 损伤失效判据
- 应变率效应
- 材料库

具备弹性模型、弹塑性模型，超弹模型，粘弹模型，ANAND模型，混凝土材料、陶瓷材料等，涵盖线性多项式、结构、可燃物、空气等状态方程，具有Lemaitre损伤模型、Gurson损伤模型、Rousselier损伤模型、Johnson-Cook损伤模型、Borvik损伤模型。

具有多种塑性准则可选： Tresca 准则、Von-Mises准则、Mohr-Coulomb准则、Drucker-Prager准则、Johnson-Cook准则、Borvik准则、HJC 混凝土、JH1 陶瓷、JH2 陶瓷、JH3 陶瓷、JHB 陶瓷、JHB-PC 陶瓷等。

可考虑应力率，包含Jaumann应力率、Truesdell 应力率模型和Green - Naghdi应力率模型。

对于超弹材料，有Saint Venant-Kirchhoff本构模型、Neo-Hookean本构模型和Modifed Neo-Hookean本构模型。

本构模型

- 弹性模型，弹塑性模型，粘弹模型等
- 专用材料本构，如混凝土、陶瓷、ANAND材料模型等
- Saint Venant-Kirchhoff、Neo-Hookean、Modifed Neo-Hookean等超弹模型
- 可灵活组合本构模型、塑性准则、损伤判据、应变率效应等
- 常用材料库

塑性流动准则

- Tresca 准则、Von-Mises准则
- Mohr-Coulomb准则、Drucker-Prager准则
- Johnson-Cook准则、Borvik准则
- HJC 混凝土、JH1 陶瓷、JH2 陶瓷、JH3 陶瓷、JHB 陶瓷、JHB-PC 陶瓷

应力率

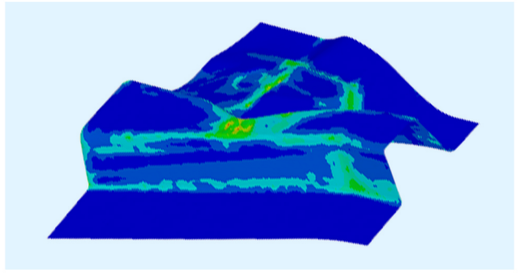
- Jaumann应力率
- Truesdell应力率
- Green - Naghdi应力率

损伤模型

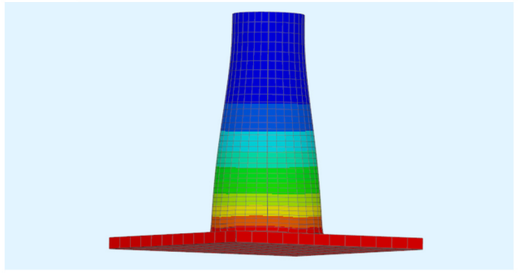
- Lemaitre损伤模型
- Gurson损伤模型
- Rousselier损伤模型
- Johnson-Cook损伤模型

状态方程

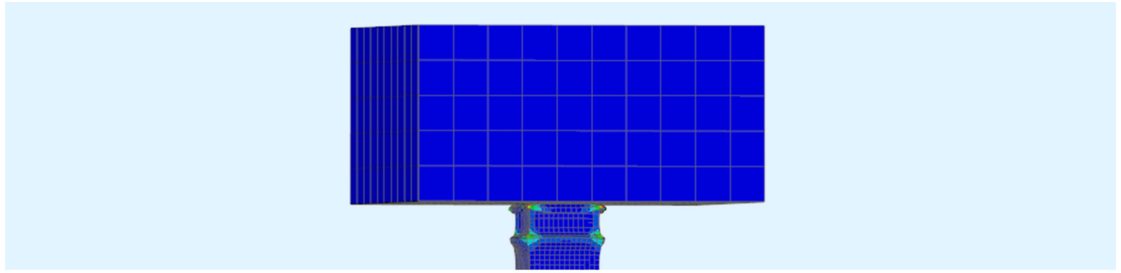
- Jones-Wilkins-Lee
- Mie-Gruneisen
- Polynomial
- Gamma-Law



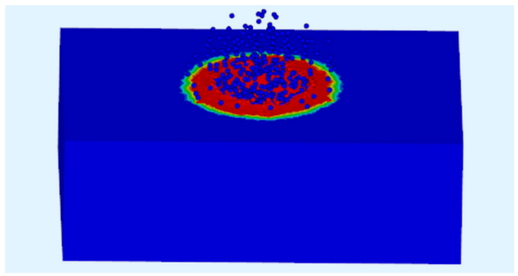
金属成型



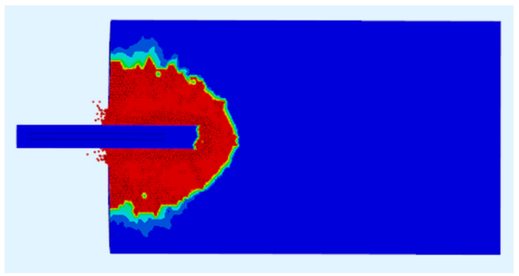
泰勒杆冲击



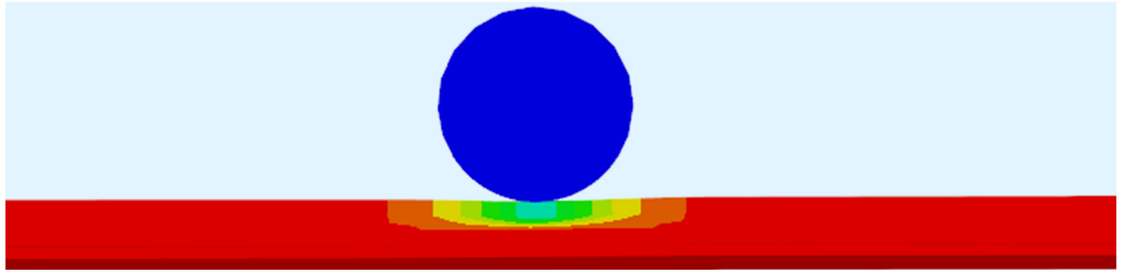
金属管压溃



爆炸



混凝土侵彻



Neo-Hookean超弹模型，小球跌落

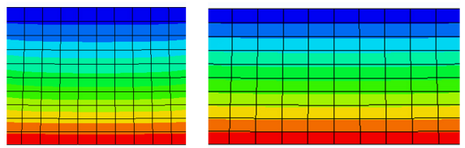
技术特点

显式/半显式求解方法

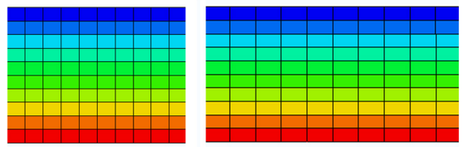
非线性动力方程的半显式无条件稳定方法，适用于长时间的非线性动力响应问题和准静态问题。是无条件稳定和二级精度，但无须迭代。

TF-Solid [Dyna]软件具有非线性动力方程的显式条件稳定方法。

- 适用于短时间的非线性瞬态动力响应问题；
- 适用于爆炸和冲击问题；
- 适用于穿甲和破甲过程；
- 适用于爆炸成型穿甲过程；
- 适用于穿甲爆炸过程；



显式条件稳定求解方法

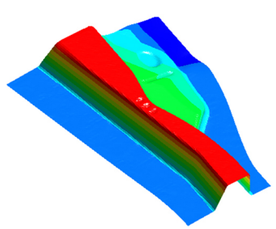


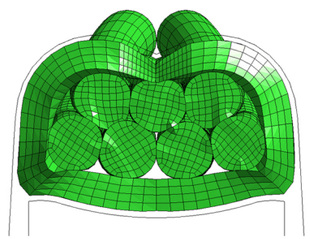
半显式条件稳定求解方法

稳定有效的接触算法

具备全局/局部接触搜索算法，精度高，抗界面穿透。在定义接触问题时，对任意多的物体无需提前定义，无需任何附加信息，在多体的各种运动状态下自动进行各物体之间距离测定，并进一步自动建立接触面的局部约束算子。可自动实现任意多物理之间的碰撞，简化前处理。可自动实现破坏后的裂缝闭合接触模拟。

- 支持变形体与变形体、变形体与刚体、刚体与刚体接触、有限元与SPH接触
- 接触对定义：通用接触、表面对表面接触
- 接触对离散形式：点对面、面对面的离散算法
- 接触属性：硬接触、软接触
- 法向接触属性施加方法：Lagrange乘子法、罚方法
- 摩擦模型：库伦摩擦

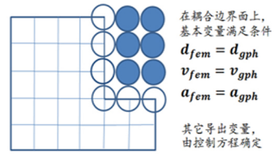


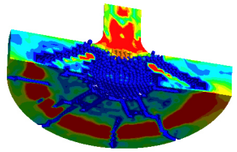


复杂接触面搜索与稳接触力稳定计算

高精度SPH智能转换方法

具有高精度自适应光滑粒子算法，充分发挥了有限元和无网格技术的特点，适应于对破坏效应的模拟；可准确模拟材料破坏现象，以及侵彻过程，特别时冲击波的传播和反射过程，可用于模拟分析陶瓷等脆性材料的侵彻和各种破坏问题。在模拟材料断裂时，材料没有完全断裂之前是有限元模型，材料断裂后自动转换为粒子模型。

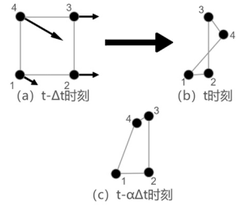


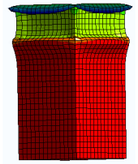


FEM-SPH智能转换

基于任意构型的连续介质模型描述

具有任意构型的连续介质模型，是纯拉格朗日构型和纯欧拉构型时任意构型的两个特例。任意构型充分吸收了纯拉格朗日构型和纯欧拉构型各自优势，克服各自的缺点，适用范围宽，兼容能力强。可描述大位移、大转动，具有精度高、抗畸变性能强的特点。

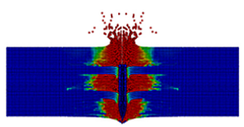




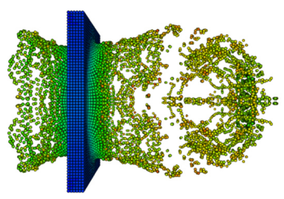
网格畸变状态下的稳定求解

物质点方法

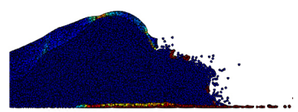
TF-Solid [Dyna] 软件具备MPM（物质点）方法，避免了网格畸变和对流项处理，兼具拉格朗日和欧拉算法的优势。能够模拟极端载荷下的动态力学响应。并可搭配欧拉求解器，模拟爆轰波与冲击波的爆炸传播过程。



多层混凝土靶板侵彻



超高速冲击

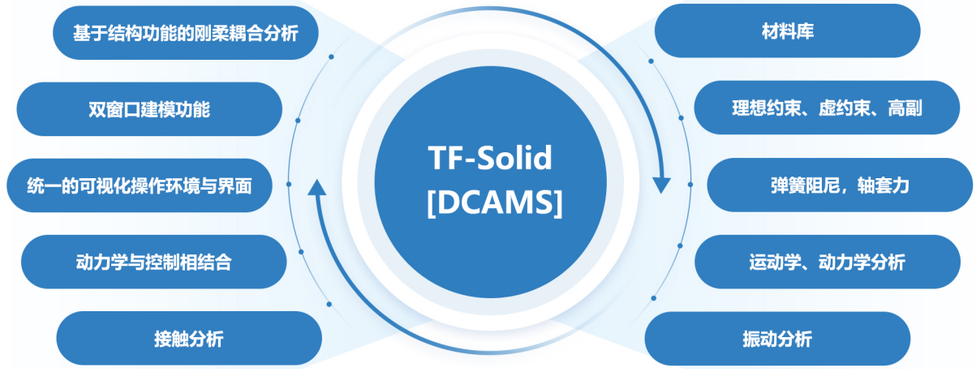


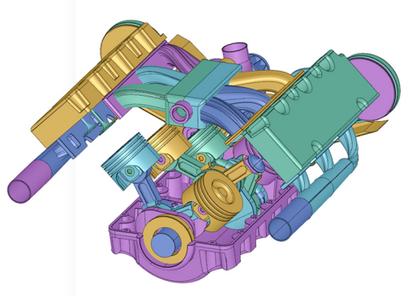
金属射流

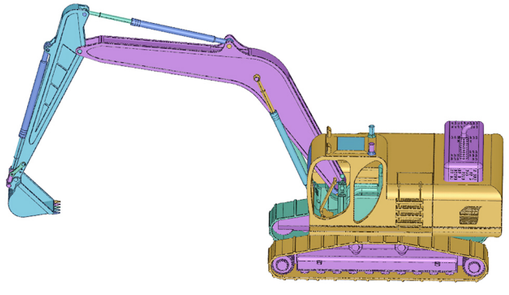
TF-Solid [DCAMS]

TF-Solid [DCAMS]是TF-Solid 平台上的一款机械系统动力学仿真软件，能够对虚拟机械系统进行静力学、运动学和动力学分析，输出位移、速度、加速度和反作用力曲线。其柔体建模技术是基于自有的结构功能分析技术，能更准确地反应结构的真实状态，且自由度大大降低。可广泛应用于电气机械、电子电器、汽车与轨道交通、航空航天等领域，预测机械系统的动态性能、运动范围、碰撞检查、峰值载荷及运转周期等，帮助用户获得最优设计方案，提高产品性能，从而减少昂贵、耗时的物理样机试验，提高产品设计水平、缩短产品开发周期和产品开发成本。

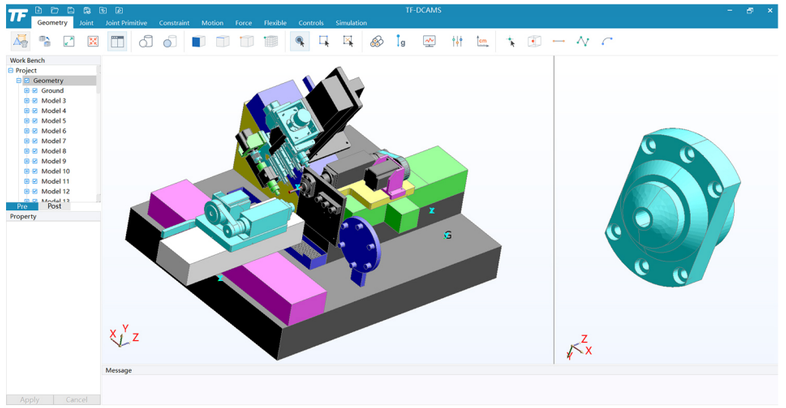
TF-Solid [DCAMS]提供统一的可视化操作环境与界面，用户可以轻松完成软件各项功能设置与切换，对几何模型、网格、载荷、约束及计算结果（包括远程集群环境的数据）进行流畅的可视化，并在Windows、Linux等系统间进行跨平台操作。具备双窗口建模功能，可以在副窗口对大型装配体中的单一部件进行单独编辑，在主窗口对多部件进行组装，使得模型装配简单高效。

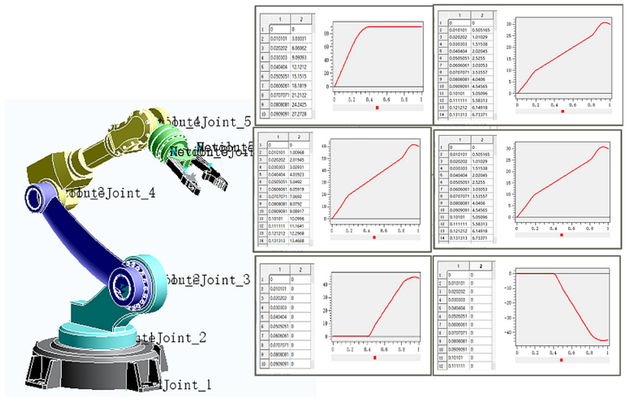


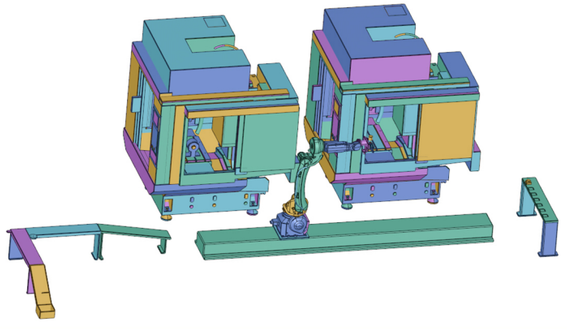




技术特点



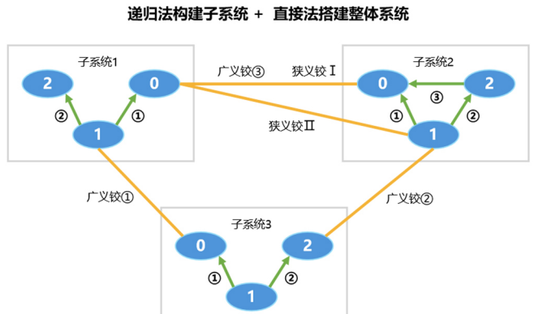




技术特点

全局/递归混合解法

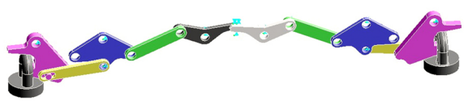
多体之间约束方程的构建有两种主流方式：一种是基于全局笛卡尔坐标构建，另一种是基于关节相对坐标构建。通常情况下，笛卡尔坐标描述直观、易于理解，也比较方便采用统一地模式对不同的约束进行程序实现和组装，但通常自由度较多、冗余约束方程也可能较多，而关节坐标描述约束的方式，通常也被称为递归算法，递归算法更灵活，方程的自由度更少，求解效率也更高。TF-Solid [DCAMS]结合两种方法各自的优势，采用子系统构建整体系统的方式进行建模，子系统内部采用关节坐标描述，减少自由度提高计算效率，子系统组装到整体系统时采用笛卡尔坐标描述，便于灵活地实现子系统的拆装



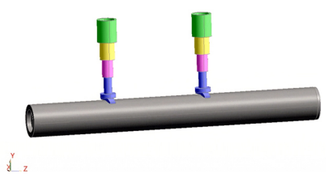
全局/递归混合解法系统结构

稳健的接触算法

具备全局/局部接触搜索算法，精度高，抗界面穿透。在定义接触问题时，对任意多的物体无需提前定义，无需任何附加信息，在多体的各种运动状态下自动进行各物体之间距离测定，并进一步自动建立接触面的局部约束算子。可自动实现任意多物理之间的碰撞，简化前处理。



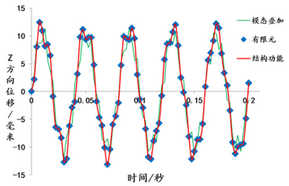
复杂运动机构动力学与接触分析



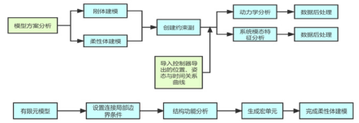
投放系统机构动力学与接触分析

基于结构功能的刚柔耦合方法

十沣自研的特色柔性体建模技术——基于动力减缩的结构功能分析方法，相比传统柔性体建模采用的模态叠加法，其计算精度显著提高，该方法在降阶的同时还做到了几乎无损地还原有限元大模型的计算结果，同时，其计算效率相对比模态叠加法提高了一个数量级。基于该方法的刚柔耦合分析，其计算精度和效率也会显著提升



结构功能与模态叠加法结果的比较



基于结构功能的刚柔耦合分析流程

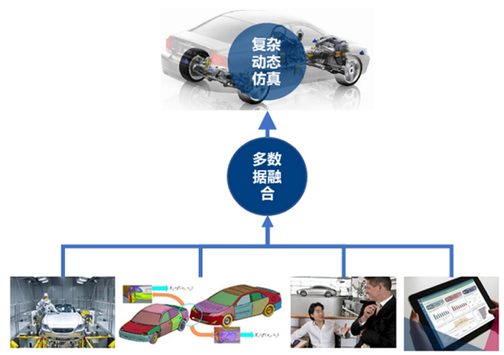


某脱钩机构刚柔耦合分析

实验建模方法

传统仿真模型根据设计数据进行搭建，而实际中，由于加工误差、装配误差等，结构的完工数据往往与设计数据存在不小的差异，通过实验数据对模型进行修正可以显著提高分析精度。而结构中各个参数之间相互关联耦合，如何设计测量参数、实验方式以及如何使用实验数据对模型修正，都是实验建模的难点。为提高仿真模型的准确性，使模型能够反映真实物理现象，TF-Solid [DCAMS]架构与所使用的技术可考虑后续的实验方案设计与控制算法耦合，方便扩展加入实验建模功能。

- 使用惯性效应和变形效应解耦技术实现了结构部件动力模型的实验建模
- 实现多数据源（传统、实验、解析、经验、大数据等）模型融合的仿真建模
- 在保证精度的条件下，模型的离散尺寸接近采样定理的极限：二分之一波长
- 在保证精度的前提下，实现复杂结构系统级（部件集合系统）动态仿真



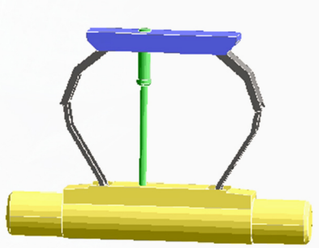
行业应用

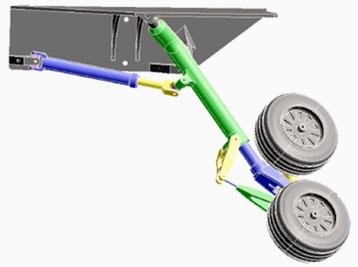


航空航天领域

自上世纪60年代以来，随着计算机技术的飞速发展，CAE技术已经成为航空航天工程设计和分析不可或缺的工具。CAE技术使工程师能够通过高精度的数值模拟，来预测结构在各种载荷和环境条件下的响应，从而在实物制造之前优化设计，减少实物测试的次数和成本，加快产品的研发周期。

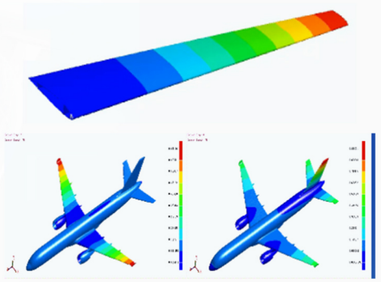
当前，航空航天领域结构仿真的难点包括：多物理场耦合仿真、非线性问题、高性能材料、疲劳与断裂、超音速与高温、多尺度仿真、尺寸效应和细节模拟、结构优化与多学科优化等面向复杂应用场景的多学科联合仿真与优化设计。TF-Solid 软件底层架构设计支持系统级多学科联合仿真，具备流、固、热、声等多场耦合能力，支持几何、材料、接触非线性分析，支持高性能复合材料多尺度分析功能，具备独有的动态子结构方法，以及增减材一体化的结构优化方法，能够帮助用户进行材料、部件的性能验证、结构优化设计与实验建模修正。

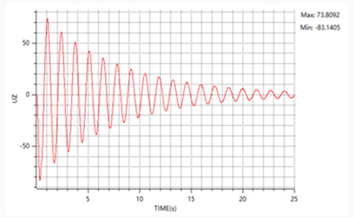




飞行器机构运动与动力特性仿真

多体动力学、非线性接触、柔性变形耦合的多学科联合仿真





飞机整机动力学分析

采用自研的MSE求解器进行大规模整机模型的模态分析求解，
采用瞬态方法计算机翼受冲击载荷后的动力学响应。

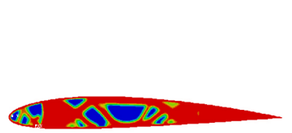
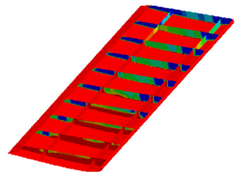
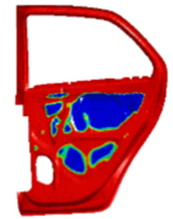
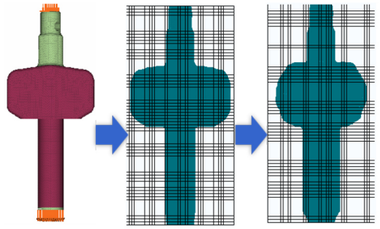
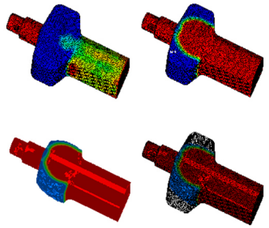
智能制造领域

智能制造技术已经成为工业4.0的标志性力量，智能制造技术赋予了制造业全新的活力，它结合了先进的信息技术、人工智能、物联网以及机器人技术，彻底改造了传统生产线。现代工程师借助这些技术，能够实现高度自动化和精确控制的生产流程，极大提升了生产效率和产品质量，同时降低了资源消耗和运营成本。

TF-Solid 软件平台提供一体化的智能制造解决方案，软件具备通用结构分析、显式动力学分析、多体动力学分析、结构优化分析以及多学科联合仿真功能，并且支持面向应用场景的实验建模、感知数据、控制算法等扩展能力与数据处理能力，能够支持软硬件一体化的系统级联合仿真。通过TF-Solid ，企业将迈入高效、精准、灵活的未来制造新纪元，不仅仅是生产力的飞跃，更是向着智能、绿色、可持续发展的未来迈出了坚实的一步。

典型部件的增减材一体化优化设计

基于增减材一体化的设计方法，TF-Solid [Struct]可以实现结构的轻量化设计，考虑加工工艺约束的拓扑优化，以及维持重量不变的性能改进设计。

机械系统多体动力学与刚柔耦合仿真

基于自研的动态子结构方法，TF-Solid [DCAMS]可以实现快速刚柔耦合计算，柔性体建模方法在保证精度的前提下，可将自由度缩减3个数量级，计算速度提高2个数量级，并可考虑柔性边界效应。